

ВИВЧЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ НЕМАТИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ У НАВЧАЛЬНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ

У статті розглядається проблема удосконалення навчального експерименту у вищих навчальних закладах. Пропонується лабораторна робота по вивченню процесів переносу носіїв струму провідності у нематичному рідкому кристалі, який знаходиться у різних фазових станах.

Розроблена конструкція комірки, яка дозволяє усунути вплив неоднорідностей електричного поля на значення питомої електропровідності досліджуваної речовини. Показано, що питома електропровідність є чутливим параметром не тільки до наявності іонних сполук в нематичному рідкому кристалі, але й до зміни його надмолекулярної структури.

Ключові слова: лабораторна робота, слабкі електроліти, нематичний рідкий кристал, питома електропровідність, енергія активації провідності.

Вступ. Лабораторні практикуми є основою вивчення курсу загальної фізики у вищих технічних навчальних закладах. Крім всебічного засвоєння програмного матеріалу, вони формують науково-дослідне мислення студентів. Одним з напрямків розв'язку цієї задачі є створення лабораторних робіт з використанням сучасних наукових методів дослідження об'єктів, які є модельними при вивченні фізичних явищ.

До таких об'єктів можна віднести рідкі кристали, оскільки поєднання властивостей твердокристалічного та рідкого станів речовини дає можливість вивчати різні фізичні явища і процеси. Так, рідкі кристали ефективно використовуються при вивченні фазових переходів речовини, інтерференції, дифракції, подвійного променезаломлення, поляризації, оптичної активності світла [1].

Аналіз публікацій та постановка проблеми. Визначення питомої електропровідності слабких електролітів забезпечується кондуктометричним методом, який є складовою частиною фізико-хімічних методів аналізу розчинів [2]. Обладнання експериментальної установки для визначення питомої електропровідності розчинів включає кондуктометричну комірку, що являє собою скляну посудину з двома платиновими електродами. Між електродами створюється змінне електричне поле в широкому діапазоні частот, що виключає електрохімічні реакції біля електродів та утворення просторового електричного заряду внаслідок виникнення подвійних електричних шарів на поверхнях електродів. Але така комірка має ряд суттєвих недоліків, які заважають отримувати достовірні значення питомої електропровідності розчинів. До цих недоліків можна віднести необхідність визначення калібруванням сталої кондуктометричної комірки та наявність краєвих ефектів, що пов'язані з неоднорідністю електричних полів на краях електродів.

Одним з варіантів розв'язку цієї проблеми є моделювання еквівалентної двоелектродної комірки у вигляді багатоелементного двополосника, в якому інформативними параметрами є активна та реактивна складові комплексної провідності [3; 4]. На думку автора більш ефективним вирішенням задачі про вимірювання достовірних значень питомої електропровідності слабких електролітів є заміна класичної двоелектродної кондуктометричної комірки на триелектродну комірку, в якій краєві ефекти усуваються за допомогою додаткового охоронного електроду.

У статті пропонується лабораторна робота по вивченню процесів переносу носіїв струму провідності у нематичному рідкому кристалі, який знаходиться у різних фазових станах. Метою цієї роботи є завдання показати, як саме подвійна природа рідких кристалів дозволяє використати їх в якості модельного об'єкту під час вивчення механізму електропровідності у цих речовинах. Вона може бути складовою частиною будь-якого спецпрактикуму з фізики для студентів інженерних спеціальностей [5].

Викладення основного матеріалу. Рідкі кристали при найбільш ретельному очищенні мають відчутну електропровідність $10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} < \sigma < 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, що вказує на присутність носіїв струму провідності. Механізм електропровідності у рідких кристалах переважно іонний, що дає можливість віднести рідкі кристали до слабких електролітів [6]. Це означає, що носіями струму є позитивні та негативні іони, природа яких пояснюється наявністю домішок вихідних продуктів синтезу, дисоціацією власних молекул рідких кристалів та молекул домішок, інжекцією електронів з електродів і наступним утворенням іонів, іонізацією під дією радіоактивного та космічного випромінювань. У залежності від значення напруженості електричного поля між електродами процес переносу носіїв струму може

ускладнюватися електрохімічними реакціями на електродах, утворенням просторового заряду біля електродів тощо.

Моделюючи процес переносу носіїв струму у рідкому кристалі, струм провідності можна уявити як напрямлений рух «кульок» – іонів у системі орієнтованих «стержнів» – молекул. Розглянемо дві орієнтації молекул нематичного рідкого кристалу у комірці, між електродами якої створене слабке електричне поле, і прослідкуємо за рухом позитивного іона (рис. 1). Як у першому так і другому випадку позитивний іон рухається вздовж ліній напруженості електричного поля. Але, у випадку а) цей рух відбувається більш легко, ніж у випадку б), оскільки у другому випадку орієнтація молекул більш заважає рухові іона.

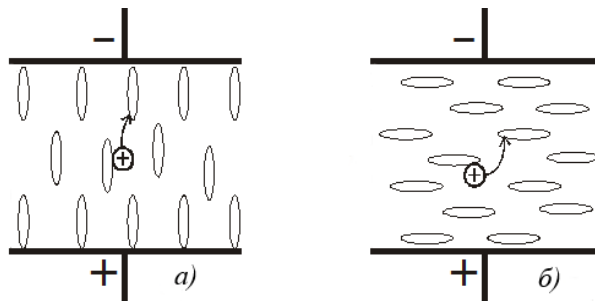


Рис. 1. Модель механізму електропровідності у нематичному рідкому кристалі

Отже, питома електропровідність вздовж довгих молекулярних осей (σ_p) виявляється більшою, ніж питома електропровідність у випадку, коли довгі осі молекул орієнтовані перпендикулярно до ліній напруженості електричного поля (σ_{\perp}). У цьому проявляється анізотропія питомої електропровідності (властивість твердих кристалів) $\Delta\sigma = \sigma_p - \sigma_{\perp}$, яка завжди є додатною, оскільки молекули нематичних рідких кристалів мають видовжену форму.

З іншого боку, чутливість питомої електропровідності до зміни надмолекулярної структури рідких кристалів дає можливість визначати за кривими температурної залежності питомої електропровідності температурні інтервали існування рідкокристалічної фази.

Залежність питомої електропровідності від температури у рідкокристалічній фазі підпорядковується закону:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \tag{1}$$

де σ_0 – стала для даного рідкого кристалу, k – стала Больцмана, T – термодинамічна температура, ΔE – енергія активації провідності [5].

Енергію активації провідності можна інтерпретувати як величину енергетичного бар'єру, який повинен подолати носій струму для свого переміщення всередині рідкого кристалу. Згідно рис. 1 енергія активації провідності ΔE_{\perp} у випадку б) повинна перевищувати енергію активації провідності ΔE_p у випадку а).

Логарифмуючи рівняння (1), одержимо лінійну залежність:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T}\right). \tag{2}$$

Тангенс кута нахилу прямої залежності (2) чисельно дорівнює відношенню $\frac{\Delta E}{k}$, що дає можливість розрахувати величину енергії активації провідності.

На рис. 2 наведена схема експериментальної установки, яка включає комірку з рідким кристалом (1), рідинний термостат типу ТЖ-0-03 (2), місток змінного струму типу Е7-10 (3), електромагніт (4).

Комірка являє собою плоский конденсатор з охоронним електродом, який має бути заземленим. Це дає можливість уникнути впливу крайових ефектів на достовірність одержаних результатів.

На рис. 3 подано переріз комірки. Вона складається з двох окремих напівциліндрів (1,3), виготовлених з латуні. Поверхні напівциліндрів відшліфовані і покриті шаром хрому. Один з напівциліндрів являє собою два жорстко закріплених і ізольованих один від одного електроди: вимірювальний (2) і охоронний (3). Діаметр вимірювального електроду дорівнював $(20,0 \pm 0,1)$ мм. Товщина шару рідкого

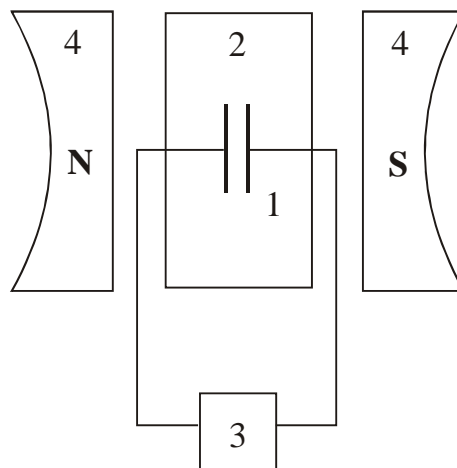


Рис. 2. Схема експериментальної установки

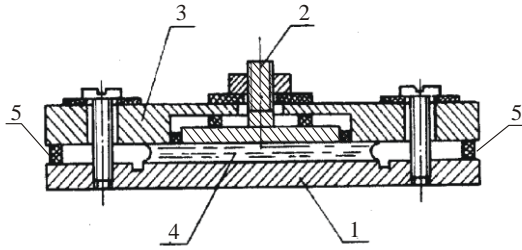


Рис. 3. Будова комірки для вимірювання питомої електропровідності

Напруга на електродах комірки не перевищувала 4,3 В. Цього було достатньо, щоб створити у рідкокристалічному шарі слабе електричне поле, яке не впливало на орієнтацію молекул відносно площини електродів. Вимірювальна частота містка змінного струму дорівнювала 1000 Гц, що виключала електрохімічні реакції на електродах і поляризацію зразка.

Питома електропровідність обчислювалася за формулою: $\sigma = G \frac{d}{S}$, де G – провідність зразка, що вимірюється містком змінного струму; d – товщина зразка; S – площа електроду комірки. Товщина зразка визначалася за формулою для ємності плоского конденсатора, для якого діелектриком слугувало повітря: $d = \frac{\epsilon_0 S}{C_0}$, де ϵ_0 – електрична стала; S – площа електроду комірки; C_0 – ємність порожньої комірки, яка вимірюється містком змінного струму.

На рис. 4 подано у напівлогарифмічному масштабі температурну залежність питомої електропровідності нематичного рідкого кристалу 4-пентил-4'-ціанобіфенілу (5ЦБ). Із збільшенням температури питома електропровідність 5ЦБ зростає. Відомо, що питома електропровідність визначається співвідношенням: $\sigma = en\mu$, де e , n і μ – відповідно заряд, концентрація і рухливість носіїв струму. Пояснюється зростання σ збільшенням як концентрації носіїв струму внаслідок дисоціації молекул, так і збільшенням їх рухливості, оскільки в'язкість рідкого кристалу з температурою зменшується.

Як бачимо з рис. 4, у рідкокристалічній фазі має місце анізотропія питомої електропровідності, а в ізотропному стані вона відсутня. З графіку можна визначити температуру фазового переходу $НРК \rightarrow IP$, яка для 5ЦБ дорівнює $(35,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Розрахунки показують, що $\Delta E_{\perp} > \Delta E_{\parallel}$. Цей факт є наслідком додатної анізотропії питомої електропровідності для нематичних рідких кристалів. Він підтверджує, що рух носіїв струму у напрямку довгих молекулярних осей відбувається більш легко. Для 5ЦБ $\Delta E_{\perp} = 0,77$ еВ, $\Delta E_{\parallel} = 0,68$ еВ при відносній похибці 3 %.

Висновки

1. Запропонована лабораторна робота дозволяє вивчити механізм електропровідності в нематичних рідких кристалах.
2. Розроблена конструкція комірки, яка усуває вплив неоднорідностей електричного поля на значення питомої електропровідності досліджуваної речовини.
3. Показано, що питома електропровідність є чутливим параметром не тільки до наявності іонних сполук в нематичному рідкому кристалі, але й до зміни його надмолекулярної структури.
4. Запропоновано застосовувати дану методику до вимірювання питомої електропровідності слабких електролітів різної природи, в тому числі для оцінки якості питної води.
5. Розглянута лабораторна робота не тільки розкриває механізм провідності нематичних рідких кристалів, але й ознайомлює студентів з елементами наукового пошуку (застосування теорії, одержання

кристалу (4) задається скляними пластинками (5) завтовшки 150÷300 мкм. Рідкий кристал у міжелектродному просторі утримується капілярними силами.

З метою вимірювання σ_{\parallel} і σ_{\perp} орієнтація молекул рідкого кристалу відносно площини електродів змінюється за допомогою магнітного поля. Анізотропія діамagnetної сприйнятливості і рідкий стан нематичних рідких кристалів дозволяє орієнтувати молекули цих речовин довгими осями вздовж ліній напруженості магнітного поля індукцією 0,1 Тл. Повертаючи комірку на 90° відносно полюсів магніту вимірюються величини σ_{\parallel} і σ_{\perp} .

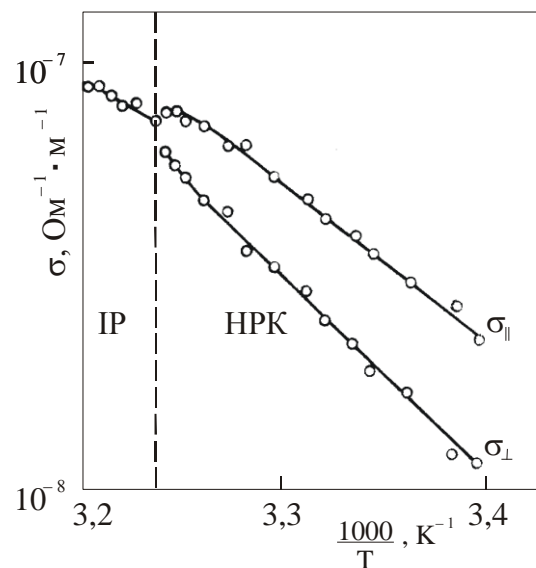


Рис. 4. Залежність питомої електропровідності нематичного рідкого кристалу 5ЦБ: IP – ізоотропна фаза; НРК – рідкокристалічна фаза

експериментальних даних та їх обробка математичними методами, обговорення і аналіз одержаного результату). Вона показує, що поєднання властивостей твердого кристалічного стану і ізотропного рідинного стану речовини у рідких кристалах визначає ці матеріали як перспективні у навчальному фізичному експерименті.

Використані джерела

1. Ситников О.П. Рідкі кристали в фізичному навчальному експерименті / О.П. Ситников // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики : Зб. наук. пр.: Вип. 4: В 3-х томах. – Кривий Ріг: вид. відділ НМетАУ, 2004. – Т.2: Теорія та методика навчання фізики. – С. 400-408.
2. Зінчук В.К. Фізико-хімічні методи аналізу : навчальний посібник / Зінчук В.К., Левіцька Г.Д., Дубенська Л.О. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. – 362 с.
3. Гонсьор О.Й. Вдосконалення нормативно-методичного забезпечення для оцінювання якості питного водопостачання: автореф. дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення / Оксана Йосипівна Гонсьор; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 20 с.
4. Міхалева М.С. Розвиток нормативно-методичного забезпечення оперативного визначення характеристик рідин для контролю стічних вод: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення / Марина Станіславівна Міхалева ; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2012. – 23 с.
5. Ситников О.П. Лабораторний практикум по вивченню фізичних властивостей води для студентів інженерних спеціальностей / О.П. Ситников // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Вип. 137. Серія: педагогічні науки. – Чернігів: ЧНПУ, 2016. – №137. – С. 280-283.
6. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов / Л.М. Блинов. – М. : Наука, 1978. – 384 с.

Sitnikov A.

A STUDY OF THE MECHANISM OF ELECTRIC CONDUCTIVITY OF NEMATIC LIQUID KRYSALS IN AN EDUCATIONAL EXPERIMENT

In the article shows the problem of educational experiment improvement in higher educational establishments. Laboratory work by learning the processes of conductivity current transmitters' transfer in a nematic liquid crystal which is found in different phase states is offered.

A model of conduction mechanism in liquid crystals, which is confirmed by experimental results. Shown that nematic liquid crystals dependence of conductivity on temperature is exponential in nature. This allows you to determine the activation energy of conductivity, which can be interpreted as the magnitude of the energy barrier that must be overcome current carrier during its move from molecule to molecule liquid crystal along the lines of the electric field.

The design of the cell, which eliminates the influence of heterogeneity of the electric field to the value of the electrical conductivity of the substance. It is shown that the electrical parameter is sensitive not only to the presence of ionic compounds in the nematic liquid crystal, but also to change its supramolecular structure.

Proposed to apply this technique to measure the conductivity of weak electrolytes of different nature, including the assessment of drinking water quality.

It is shown that a laboratory work not only reveals the mechanism of conductivity nematic liquid crystals, but also introduces students to the elements of scientific research (application of theory to obtain experimental data and mathematical processing methods, discussion and analysis of results). It shows that the combination of properties of the solid crystalline state and an isotropic liquid state of matter in the liquid crystal determines these materials as promising in educational physical experiment.

Key words: *laboratory work, weak electrolytes, nematic liquid crystal, electrical conductivity, activation energy of conductivity*

Стаття надійшла до редакції 10.03.2017 р.